



**ТЕРЯЄВ В.І.**, канд. техн. наук, доцент,  
**БУР'ЯН С.О.**, канд. техн. наук, доцент,  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»  
**СТЯЖКІН В.П.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
 ІЕД НАН України

## ПРИНЦИП УЗГОДЖЕНОГО РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ГЕНЕРАТОРА ТА ЕЛЕКТРОДВИГУНА В РЕЖИМІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

*Завдання, яке вирішується у даному дослідженні, полягає у розширенні функціональних можливостей генератора та двигуна в режимі електричного гальмування за рахунок регулювання координат електричної машини в генераторному режимі. Особливістю запропонованого способу керування є те, що одна або декілька координат генератора або двигуна в режимі електричного гальмування примусово задаються зовнішнім джерелом енергії, а метою узгодженого регулювання інших координат електричної машини є забезпечення заданого закону перетворення механічної енергії в електричну або алгоритму руху виконавчого органу робочої машини. Наведено приклад синтезу алгоритму керування оберненим режимом роботи електроприводу насосної установки гідроакumuлюючої електростанції.*

*Ключові слова:* генератор, електродвигун, електричне гальмування, зовнішнє, джерело, енергія, узгоджене, регулювання, генерація

**Вступ.** Існує ряд установок та технологічних процесів, рух в яких здійснюється за рахунок зовнішнього джерела енергії, а електрична машина, не будучи основним джерелом руху, постійно або періодично знаходиться в режимі генераторного електричного гальмування для забезпечення потрібних характеристик робочого процесу. Такі режими руху характерні для турбін вітрогенераторів, насосів та вентиляторів в оберненому режимі роботи, підйомно-транспортним машинам в режимі опускання вантажу, механізмам неперервних прокатних станів, поєднані рухомою смугою, рухомому складу транспортних засобів в процесі гальмування та іншим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі підходи до керування режимами генерації або генераторного гальмування електричних машин, як правило, мають обмежене використання і вузьке спрямування на конкретні схематичні рішення для окремих видів електричних машин, перетворювальних пристроїв та механізмів. Їх недоліком є також відсутність керованості процесом перетворення електричної енергії в режимах генераторного гальмування в широких межах.

**Постановка завдання.** Задачею даного дослідження є розширення функціональних можливостей генератора та двигуна в режимі електричного гальмування на основі застосування узагальнених підходів до синтезу алгоритмів керування енергетичними установками з використанням

запропонованого принципу узгодженого регулювання координат [1], який полягає в тому, що одна або декілька координат електричної машини задаються зовнішнім джерелом руху, а регулюванням інших координат забезпечується здійснення керованого режиму генерації енергії.

**Матеріали досліджень.** У багатьох галузях промисловості, комунального господарства, транспорту, гідроенергетики відбувається накопичення значної кількості рідини у резервуарах. В якості прикладів можна навести водонапірні башти, ємності пивзаводів, нафтосховища, шлюзи, танкери, приливні та гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС). Загальною рисою вказаних гідроустановок є перетворення електричної енергії, яка споживається насосною установкою під час нагнітання рідини у резервуар в потенціальну енергію рідини, яка визначається рівнем її підйому. Як правило, в процесі зворотного витіканні рідини з резервуарів накопичена енергія витрачається безповоротно у вигляді втрат. І лише в ГАЕС передбачається повернення потенціальної енергії водної маси в електричну енергію шляхом подачі накопиченої води безпосередньо на гідротурбіни, або за допомогою насосів оберненої дії. Розглянемо роботу оборотного насосного гідроелектроагрегату (ГЕА) більш докладно.

В великих енергосистемах велику частку складають потужності теплових і атомних електростанцій, які не можуть швидко змінювати вироблення електроенергії при денних і нічних



коливаннях енергоспоживання або ж роблять це з великими втратами. Це призводить до встановлення істотно більшої комерційної вартості пікової електроенергії в енергосистемі у порівнянні з вартістю електроенергії, виробленої в нічний період. В таких умовах залучення ГАЕС економічно вигідно і підвищує ефективність використання інших потужностей, а також надійність енергопостачання.

В роботі ГАЕС застосовується комплекс генераторів і насосів, або оборотні ГЕА, які здатні працювати як в режимі генераторів, так і в режимі насосів. Під час нічного провалу енергоспоживання ГАЕС отримує з енергомережі дешеву електроенергію і витрачає її на закачку води в верхній б'єф (насосний режим). Під час ранкового та вечірнього піків енергоспоживання ГАЕС скидає воду з верхнього б'єфу в нижній, виробляє при цьому дорожчу пікову електроенергію, яку віддає в енергомережу (генераторний режим).

Досвід використання ГАЕС з метою регулювання електричних режимів показав, що вони є не тільки генеруючим джерелом, а й джерелом надання системних послуг, що сприяють як оптимізації добового графіка навантажень, так і підвищенню надійності і якості електропостачання.

В якості оборотних гідротурбін використовуються спеціальний тип радіально-осьових гідротурбін, які можуть працювати як в турбінному, так і в насосному режимах, зберігаючи при цьому високий ККД. Дана особливість досягається за допомогою лопатей, що мають спеціальну форму. Потужність таких турбін досягає 400 МВт. Робочі характеристики: напір від 40 м до 550 м; діаметр робочого колеса від 1 м до 7,5 м; особливості конструкції — робота в турбінному, насосному і компенсуючому (як синхронний компенсатор) режимах.

В той же час відомі технічні рішення передбачають в турбінному режимі переведення приводного електродвигуна ГЕУ у некерований процес рекуперативного гальмування з поверненням накопиченої потенціальної енергії рідини в електричну мережу за рахунок обертання турбіни насоса зі швидкістю, вище швидкості холостого ходу електродвигуна, який при цьому переходить у генераторний режим. При використанні в якості двигуна генератора асинхронної машини режим рекуперативного гальмування з поверненням енергії в мережу відбувається за

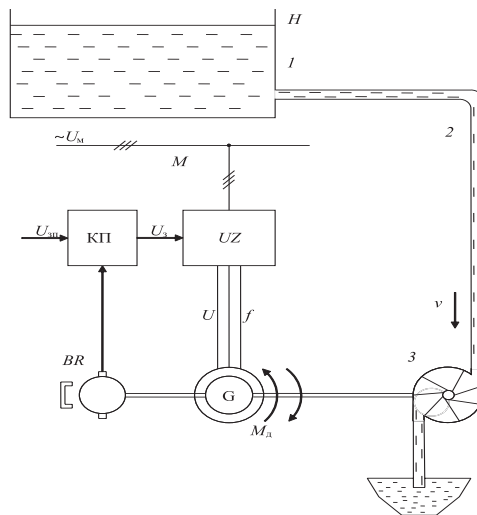


Рис. 1. Функціональна схема оборотного ГЕА

рахунок зміни фази струму статора з поверненням активної потужності у мережу. Реактивна потужність при цьому продовжує споживатись з мережі. При застосуванні синхронної машини в турбінному режимі ГЕУ здійснюється генерування енергії в мережу та компенсація реактивної потужності.

В статті наведено практичний приклад синтезу алгоритму керування для оберненого режиму роботи асинхронного електроприводу насосної установки ГАЕС на основі запропонованого принципу узгодженого регулювання координат [1]. За критерієм незмінності потужності генерування в умовах зміни рівня рідини в резервуарі синтезовано алгоритм частотного керування, який реалізовано шляхом регулювання розрахункової швидкості холостого ходу асинхронної машини, ротор якої обертається зовнішнім джерелом руху зі швидкістю, що в загальному випадку може змінюватись за довільним законом. Завданням алгоритму керування є підтримання постійної потужності генерації енергії в широких межах зміни швидкості обертання ротора, яка залежить від рівня рідини в резервуарі.

Кероване перетворення накопиченої потенціальної енергії рідини в електричну енергію здійснюється оборотним ГЕА з використанням асинхронного частотно-регульованого електроприводу. В загальному випадку ГЕА складається з

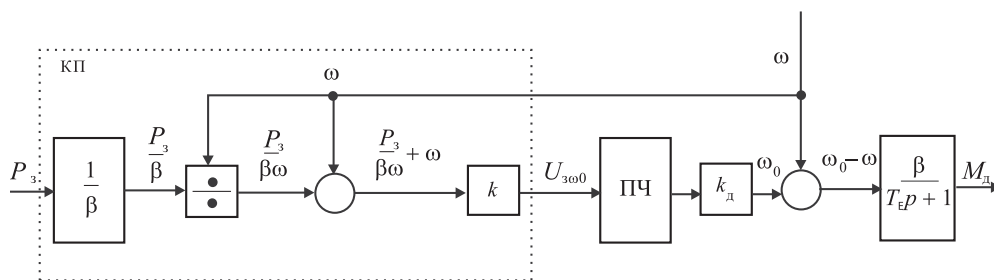


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного керування потужності в режимі рекуперативності

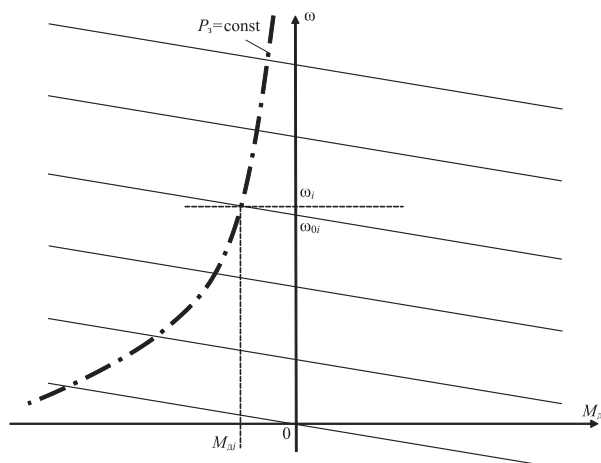


Рис. 3. Механічні характеристики асинхронного електродвигуна в режимі рекуперативного гальмування при стабілізації потужності генерації

резервуару 1, трубопроводу 2, оборотного насосу 3, асинхронного двигуна-генератора з короткозамкненим ротором Г, перетворювача частоти  $U_Z$  підключеного до мережі  $M$ , датчика кутової швидкості ротора BR та керуючого пристрою КП (див. Рис. 1). На рисунку позначені:  $U_M$  — напруга мережі живлення;  $U_{ЗП}$  — завдання потужності;  $U_3$  — завдання частоти;  $f$  — регульована частота напруги на виході перетворювача. Задачею КП є управління перетворювальним та електродвигунним пристроями з метою забезпечення заданого алгоритму роботи оборотного двигуна — генератора.

Для розробки алгоритму керування насосною установкою в режимі генерації енергії з постійною потужністю скористаємось рівнянням лінеаризованої механічної характеристики асинхронної машини (1) та спрощеною моделлю асинхронного частотно-керованого електроприводу [2]:

$$(\omega_0 - \omega) \beta = M_d = P_3 / \omega, \quad (1)$$

де  $\omega$  — швидкість ротора асинхронної машини;  $\omega_0$  — розрахункова швидкість холостого ходу;  $\beta$  — коефіцієнт жорсткості механічної характеристики

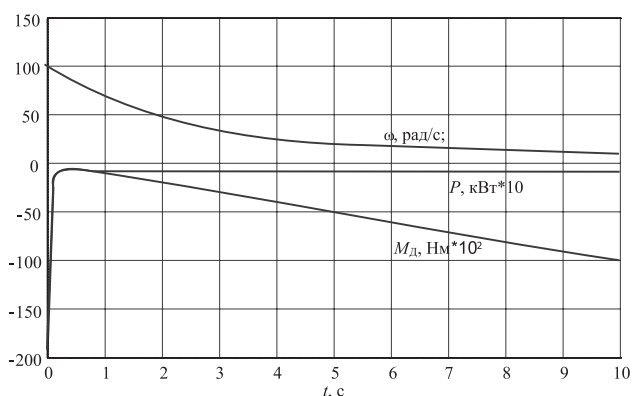


Рис. 4. Перехідний процес рекуперативного гальмування зі стабілізацією потужності генерації

ки;  $M_d$  — момент двигуна в генераторному режимі;  $P_3$  — задана потужність генерації в рекуперативному режимі. В гальмівному режимі момент двигуна та потужність мають від'ємні знаки.

При синтезі алгоритму керування приймаємо, що швидкість ротора насоса в турбінному режимі прямо пропорційно залежить від швидкості  $v$  рідини в трубопроводі.

Розв'язуючи рівняння (1) відносно  $\omega_0$ , отримуємо залежність, яка визначає закон керування швидкістю холостого ходу асинхронної машини і забезпечує незмінною задану величину активної потужності, що повертається в мережу живлення, в умовах зміни рівня і, відповідно, напору та швидкості рідини, що витікає з резервуару:

$$\omega_0 = P_3 / \beta \omega + \omega, \quad (2)$$

Як видно з (2), для реалізації даної залежності необхідна лише одна вимірювана змінна — сигнал датчика швидкості ротора асинхронної машини.

Структурна схема функціонального блока, який реалізує алгоритм керування (2), представлена на Рис. 2. На рисунку позначені:  $k_d$ ,  $T_E$  — коефіцієнт передачі та електромагнітна стала часу асинхронного електродвигуна;  $k$  — масштабуючий коефіцієнт.

Робота алгоритму керування ілюструється механічними характеристиками електроприводу, представленими на Рис. 3. Для підтримання сталого режиму рекуперативного гальмування розрахункова швидкість холостого ходу асинхронної машини повинна автоматично знижуватись відповідно до зниження швидкості витікаючої рідини, внаслідок зменшення її рівня в резервуарі; при цьому різниця швидкостей холостого ходу і ротора машини визначає величину гальмівного моменту на валу двигуна, виходячи з умови  $P_3 = \text{const}$ .

Для підтвердження працездатності розробленого алгоритму керування оберненим ГЕА було проведено моделювання генераторного режиму роботи асинхронного частотно-регульованого електроприводу для процесу вільного витікання рідини з резервуару. В процесі моделювання вважалося, що швидкість рідини в трубопроводі в турбінному режимі зворотно пропорційно залежить від часу. Останнє впливає з формули, яка описує процес вільного витіку рідини з резервуару при змінному напорі:

$$t = \frac{2SH}{\mu S_0 \sqrt{2gH}} = \frac{2SH}{\mu S_0 v}, \quad (3)$$

де  $v = \sqrt{2gH}$  — швидкість рідини в трубопроводі, м/с;  $H$  — висота рівня рідини над отвором (напір),



$m$ ;  $g$  — гравітаційна стала,  $m/c^2$ ;  $S$  — площа поверхні резервуару,  $m^2$ ;  $S_0$  — площа отвору трубопроводу,  $m^2$ ;  $\mu$  — коефіцієнт витрати.

Результати моделювання представлені на Рис. 4.

Як видно з синтезованого алгоритму та результатів моделювання частотне керування асинхронним електродвигуном в режимі генераторного гальмування при зниженні рівня рідини внаслідок витікання з резервуару забезпечує стабілізацію потужності у квазістатичному генераторному режимі в достатньо широких межах. Це підтверджує можливість здійснення узгодженого регулювання координат двигуна-генератора з метою стабілізації активної потужності, яка повертається в мережу, за потрібним законом.

**Висновки.** Обґрунтовано новий принцип узгодженого регулювання координат генераторів та двигунів в режимі електричного гальмування для установок оберненої дії, де одна або декілька координат задаються зовнішнім джерелом енергії, а регулюванням інших координат забезпечується заданий закон перетворення механічної енергії в електричну або алгоритм руху робочої машини.

1. Використання принципу узгодженого регулювання координат забезпечує керований процес перетворення механічної енергії в електричну від джерел енергії та руху різноманітної фізичної природи.

2. Показана доцільність створення оборотних ГЕА, які дозволяють здійснювати керований процес перетворення накопиченої потенціальної енергії рідини в електричну енергію.

3. Наведено приклад практичної реалізації алгоритму керування насосною установкою в оберненому режимі роботи за критерієм незмінності потужності генерування, що свідчить про можливість і доцільність використання запропонованого підходу.

4. Запропоновано методологію синтезу алгоритмів керування енергетичними, промисловими та транспортними установками, які забезпечують покращення техніко-економічних показників процесу перетворення механічної енергії в електричну.

5. Поєднання функцій генератора і електродвигуна в єдиному функціональному комплексі допомагає вирішувати проблеми енергозбереження і покращення техніко-економічних характеристик процесів і установок з регульованими електромеханічними системами.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Спосіб* регулювання координат генератора та двигуна в режимі електричного гальмування: пат. 126104 Україна, № u201712078; заявл. 08.12.2017; опубл. 11.06.2017, Бюл. № 11.
2. *Особливості* синтезу та дослідження електромеханічних систем з послідовною корекцією та частотнорегульованими асинхронними двигунами / М.Г. Попович, В.І. Теряєв, О.І. Кіселичник, С.О. Бур'ян. - Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — Кременчук: КДПУ, 2007. — Вип. 3/2007 (44) частина 2. — С. 12—16.

© Теряєв В.І., Бур'ян С.О., Стяжкін В.П. 2019

